

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

М.Г. ЗИНЧЕНКО, к.т.н., доц., **В.П. ШАПОРЕВ**, д.т.н., проф., **О.А. ТЫНДА**,
аспирант

В статье представлены результаты разработки и внедрения биологических технологий для утилизации сточных вод агропромышленных и производственных предприятий. Показаны возможности коммерческого использования биогазовых установок в различных сельскохозяйственных комплексах. Дан анализ основных направлений интенсификации процесса метанового сбраживания органических отходов. Показаны пути дальнейшего совершенствования конструктивного оформления технологии метаногенеза.

биосистема, органические отходы, энергетика, экология, метаногенез, UASB-реактор.

В настоящее время энергетическая политика Украины в целом направлена на энергосбережение и развитие технологий использования альтернативных источников энергии.

Мировой опыт показывает, что наиболее эффективными для крупномасштабного производства новых видов топлива являются методы, основанные на использовании биосистем. Среди этих методов – достаточно хорошо освоенные биологические технологии превращения биомассы в энергоносители в процессах метаногенеза. При этом источниками биомассы могут служить сельскохозяйственные отходы, специально выращенные энергетические культуры, отходы древесины, бытовые отходы и т.д.

Конечным продуктом метанового брожения является биогаз, состоящий в среднем из 65 - 70 % метана и 25 - 30 % диоксида углерода. Теплотворная способность биогаза составляет 21,5 – 23,8 МДж/м³. Комплексная обработка, включающая очистку газа от H₂S, осушку, разделение на компоненты дает возможность получить практически чистый биометан с теплотворной способностью 34 - 35,8 МДж/м³ [1], который можно использовать как газообразное топливо либо трансформировать с помощью газогенератора в электрическую и тепловую энергию.

Сброженная масса содержит биогенные элементы (азот, фосфор, калий) и обладает свойствами органического удобрения.

Таким образом, развитие биогазовых технологий – это одна из возможностей решения проблем энергетики, агрохимии и экологии.

Объемы современного производства биогаза из агропромышленного сырья в Украине можно оценить на уровне 1,6 млн. тонн условного топлива. По данным национального Агентства возобновляемой энергии, технический потенциал биогаза составляет 2,3 млрд. м³ из навоза, 0,33 млрд. м³ из сточных вод, 2,3 млрд. м³ из свалочного газа, что соответствует 28,2 ТВт·час/год. По оценкам этого же Агентства, производство биогаза в Украине достигнет 10,2 ТВт·час/год в 2030 г. и 17,4 ТВт·час/год в 2050 г.

В университете длительное время проводятся работы, направленные на интенсификацию и оптимизацию процесса метанового сбраживания, конструктивное оформление технологии. На экспериментальных образцах биореакторов в подсобном животноводческом хозяйстве Сумского НПО им. М.В. Фрунзе были проведены исследования с целью разработки эффективного технологического режима сбраживания. Для сокращения продолжительности исследований пользовались математическими методами оптимального планирования эксперимента. Совокупность факторов, оказывающих существенное влияние на процесс ферментации, и интервалы их варьирования были определены на основе априорной информации и предварительных опытов [2].

$z_1 \in \{10; 15\}$, м³/м³·сут – доза суточной загрузки – удельный объем сырья, подаваемого в реактор за сутки;

$z_2 \in \{37; 43\}$, °C – температура в реакторе;

$z_3 \in \{2; 3\}$, сут⁻¹ – количество перемешиваний реакционной массы в реакторе в течение суток;

$z_4 \in \{1; 3\}$, сут⁻¹ – частота подачи сырья в реактор за сутки;

$z_5 \in \{4; 8\}$, % – содержание (массовая доля) сухого вещества в сырье;

$z_6 \in \{7,3; 8\}$ – значение водородного показателя, pH;

$z_7 \in \{101; 105\}$, кПа – абсолютное давление в реакторе;

$z_8 \in \{5; 60\}$, мин – продолжительность каждого перемешивания;

В качестве максимизируемого критерия оптимальности использовали удельный выход биогаза Y_6 (УВБ), выраженный в кубических миллиметрах биогаза на килограмм сухого вещества навоза в секунду, $\text{мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$

Составленный план экспериментов представлен в таблице. Порядок реализации опытов был рандомизированным во времени.

Таблица – Реализация оптимального плана и результаты опытов

№	Суточная загрузка %, Z_1	Тем-ра, °C, Z_2	Кол-во перемешиваний, сут^{-1} , Z_3	Частота загрузки, сут^{-1} , Z_4	Содержание сухого вещества, %, Z_5	Водородный показатель, pH, Z_6	Абсолютное давление, кПа, Z_7	Продолжительность перемешивания, мин, Z_8	Удельный выход биогаза (опыт), $\text{мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$	Удельный выход биогаза (расчет) $\text{мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$
7	10	43	2	2	4	7,5	105	60	148	147
4	15	43	2	2	4	7,5	104	5	181	181
9	10	37	2	2	4	7,3	105	5	171	171
2	10	43	2	1	4	7,3	103	5	108	108
5	10	43	3	2	4	7,3	103	5	146	143
1	10	43	2	2	4	7,3	101	5	138	143
8	10	43	2	2	4	8,0	103	5	157	157
3	10	43	2	2	8	7,3	102	5	155	154
6	10	43	2	2	8	8,0	103	5	167	168
Новый основной уровень										
	10, 1	42	3	2	5	7,5	103	5	167	168
Шаг варьирования										
	3	5	0	1	2,5	0,5	0	0		
Опыты на векторе-градиенте										
10	13	37	3	3	7,5	8	103	60	204	273
11	16	32	3	4	10	8	103	60	120	378
Оптимальные значения факторов										
	14	39	3	3	6,6	7,8	103	20		210

По данным экспериментов оптимальным следует считать технологический режим с параметрами:

- доза суточной загрузки – Z_1 – 14%;
- температура ферментации – Z_2 – $39 \pm 2^\circ\text{C}$;
- количество перемешиваний реакционной массы в метантенке – Z_3 – 3 сут^{-1} ;
- частота загрузки – Z_4 – 3 сут^{-1} ;
- содержание сухого вещества в исходном сырье – Z_5 – $6,6 \pm 1\%$;
- водородный показатель, pH – Z_6 – $7,8 \pm 0,2$;
- абсолютное давление в метантенке – Z_7 – $103 \pm 2 \text{ кПа}$;
- продолжительность каждого перемешивания массы в метантенке – Z_8 –

20 мин.

Как видим, показатели оптимального технологического режима отличаются высокой интенсивностью. По температурным условиям рекомендуемый технологический режим является мезофильным, однако доза загрузки (14%) значительно превышает обычно рекомендуемую для этого режима. Увеличение дробности подачи (частоты загрузки) сырья в метантенк до трех позволяет сделать процесс сбраживания более стабильным, а газовыделение – более интенсивным и равномерным.

Кроме этих параметров на скорость метаногенеза значительно влияют постоянная влажность и однородность подаваемого в метантенк сырья. В этой связи провели серию опытов и рекомендовали условия, обеспечивающие прохождение кислотогенной фазы процесса сбраживания в аппарате предварительной подготовки сырья, а именно: выдерживание нативных стоков в течение 8 часов при температуре 39°C и периодическом перемешивании в течение 20 мин. При этом отмечено увеличение в 4 раза (от 35 до 130 мг-экв/л) концентрации летучих жирных кислот, являющихся главным субстратом для анаэробных метаногенных микроорганизмов. Основная фаза – метаногенная – проходит в метантенке. Реализация интенсивного технологического режима и эффективных конструктивных решений, таких как двухступенчатая технология сбраживания, позволяет сократить общую продолжительность обработки отходов до 8-10 суток, увеличить коэффициент использования оборудования подготовки сырья к сбраживанию в 2 раза, снизить общую металлоемкость установки на 6 %.

С использованием полученных результатов в 1984 году совместно с Сумским НПО им. М.В. Фрунзе была спроектирована и построена в г. Сумы биогазовая установка "БИОГАЗ-301С" для переработки отходов свинофермы на 3000 голов животных [3].

Основные технико-экономические показатели установки:

- суточный объем перерабатываемых стоков, м ³	– 30
- производство (в сутки):	
- биогаза, м ³	– 450
- твердых удобрений, т	– 5
- жидких удобрений, м ³	– 25
- потребляемая мощность электрооборудования, кВт·ч/сут.	– 150
- объем биореактора, м ³	– 310

Биогаз утилизировали в котельной с получением горячей воды для нужд фермы.

Опыт эксплуатации установки был впоследствии использован при разработке совместно с НПО "Агробiotехнология" ряда инвестиционных предложений и проектов биогазовых установок. В частности, разработано ТЭО к инвестиционному проекту установки «БИОГАЗ 5-61С» для переработки 50 м³/сут отходов в с. Ново-Мажарово Зачепиловского района Харьковской области. Эксплуатация установки позволит получать 650 м³/сутки биогаза, утилизация которого в мотор-генераторе даст возможность полностью обеспечить собственные нужды установки в энергии, а также дополнительно получить товарную энергию: 229 кВт· час/сутки электричества и 1,7 Гкал/сутки тепловой энергии.



Рисунок – Общий вид установки «БИОГАЗ – 301С»

По заказу сельскохозяйственного колледжа провинции Онтарио (Канада) выполнено ТЭО к проекту установки «Биогаз-2-101М» для сбраживания 30 м³/сут смеси свиного и коровьего навоза с переработкой биогаза в электрическую энергию. В проекте предусмотрена дополнительная очистка жидкой фракции сброженной массы до показателей, позволяющих использовать ее в системе навозоудаления (рН – 7,5–7,6; взвешенные вещества – 75–100мг/л; ХПК–30мг/л; БПК – 21мг/л).

Для предприятия ОАО «Полтавская птицефабрика» выполнена проектная проработка технических решений для утилизации 336 м³/сут птичьего помета с

влажностью 90-91%. Проектом предусмотрена утилизация биогаза с получением электрической энергии, рекуперация тепла сброженной массы, а также производство жидких органо-минеральных удобрений и биогумуса.

Разработан инвестиционный проект «Автономный биоэнергетический центр для производства электрической, тепловой энергии и органических удобрений из отходов сельскохозяйственного производства» для агрокомбината «Слобожанский» (Харковская обл.) [4]. Реализация данного проекта позволит получить за счет утилизации отходов свинокомплекса 3750 МВт/год электроэнергии, 1711,2 Гкал/год тепловой энергии, 21900 тон/год органических удобрений.

К сожалению, по разным причинам, в основном финансового характера, эти проекты до сих пор не реализованы.

Во всех разработанных проектах предусмотрены т.н. реакторы первого поколения со свободноплавающей микрофлорой, предназначенные для переработки субстратов с высокой концентрацией взвешенных веществ, таких как отходы животноводства, осадки коммунальных сточных вод и т. п. В них процесс анаэробного сбраживания происходит при постоянном перемешивании среды для обеспечения доступа бактерий к новым порциям сырья и для отвода продуктов сбраживания; при этом вместе со сброженной массой частично вымывается и свободноплавающая микрофлора. Однако эти реакторы обладают рядом недостатков, главный из которых – низкая концентрация активной микрофлоры внутри реактора, что влечет за собой увеличение объемов метантенков, их стоимости, эксплуатационных расходов и дополнительных затрат энергии. Все это сдерживает внедрение биореакторов подобного типа в Украине.

В этой связи в дальнейших разработках кафедры акцент был сделан на интенсификацию процесса метаногенеза путем совершенствования оборудования биогазовых установок. Наиболее перспективны в этом плане реакторы второго поколения – UASB-реакторы (реакторы с восходящим потоком через слой анаэробного ила). Это высокоинтенсивные системы, в которых создаются условия для самоиммобилизации микроорганизмов – образования гранулированной биомассы бактерий с высокой метаногенной активностью. Такие реакторы находят широкое применение за рубежом для очистки высококонцентрированных стоков (от 1000 до 10000 мг ХПК/л.) перерабатывающих производств (спирта, сахара, отходов целлюлозно-бумажной промышленности и др.).

Авторами совместно с ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе» разработан технологический регламент и рабочий проект двухстадийной анаэробно-аэробной

очистки стоков для Пивненковского сахарного завода (Сумская обл.) с использованием на стадии анаэробного сбраживания UASB-реактора со взвешенно-сидиментирующей биомассой, элементы конструкции которого предотвращают вынос биомассы с очищенными стоками и способствуют ее грануляции [5]. Благодаря высокой концентрации адаптированной микрофлоры доза загрузки реактора увеличивается на порядок по сравнению с традиционным метантенком первого поколения (до 300%). Время пребывания сбраживаемой массы в биореакторе уменьшается до 2 суток, в то время как в классическом метантенке оно составляет 10-17 суток; соответственно снижается требуемый реакционный объем: для переработки 2400 м³/сут. сточных вод он составляет 800 м³. Выход биогаза увеличивается с 28-30 м³/м³ отходов до 200 м³/м³ при концентрации метана в биогазе 73-81%. На стадии метанового брожения загрязненность стоков по ХПК снижается лишь на 76-80%, поэтому для дальнейшей очистки используется аэробная обработка воды. После доочистки в аэротенках состав стоков соответствует показателям качества технической воды: взвешенные вещества – 15-20 мг/дм³, ХПК – 10-15 мг/дм³, БПК – 5-20 мг/дм³, общий азот – 1-10 мг/дм³. Установка была введена в эксплуатацию в 1996 г.

В настоящее время ведутся исследования, связанные с использованием более совершенных анаэробных реакторов – IC-UASB- реакторов – с системой внутренней циркуляции субстрата. Они сочетают в себе высокую степень перемешивания среды и хорошее удержание биомассы на выходе. Это дает возможность использовать меньшие объемы реакторов при более эффективном протекании процесса [6,7]. В Украине первый такой реактор построен на предприятии ООО «Рубежанский картонно-тарный комбинат» для переработки стоков производства картона.

Обследование работы установки позволило получить данные о динамике изменения ХПК, удельном выходе биогаза, изменении средних концентраций растворенных веществ и др., которые используются нами для разработки математической модели IC-UASB- реактора. В основу разработки положен новый подход к моделированию такого типа реакторов, основанный на линейной диффузионной модели реактора идеального вытеснения, учитывающей удельную активность метаногенных гранул, скорость осаждения ила, а также микробиологические характеристики ила, кинетику биотрансформации, массообмен в жидкой, газообразной и твердой средах [8]. В настоящее время ведутся экспериментальные исследования, направленные на уточнение параметров

модели [9]. Накопление систематизированных знаний о работе и особенностях эксплуатации ИС-реакторов будет способствовать их распространению в Украине.

ВЫВОДЫ

Представленные в статье разработки НТУ «ХПИ» в области технологии и оборудования утилизации сточных вод предприятий сельского хозяйства и пищевой промышленности с получением биогаза свидетельствуют о перспективности метода метанового сбраживания органических отходов с точки зрения энергоэффективности и ресурсосбережения. Однако в Украине биоэнергетические установки пока не получили должного развития. Их внедрение сдерживается из-за отсутствия средств; препятствием также является слабая законодательная база в вопросе защиты окружающей среды, отсутствие экономических стимулов развития этой отрасли

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Спосіб одержання метану та вуглекислого газу з очищеного від домішок біогазу. Деклараційний патент на винахід № 44512 : МПК (2006) В 01 D 53/00./ Колобродов В.Г., Карнацевич Л.В., Волчок О.И., Хажмуратов М.А. – № 2001053017 ; Заявл. 03.05.2001; Опубл. 15.02.2002; Бюл. № 2, 2002 г.
2. Зинченко М.Г. Оптимизация процесса метанового сбраживания отходов животноводческих комплексов. / М.Г. Зинченко, Н.А. Цейтлин, И.В. Семененко. // Химическое и нефтяное машиностроение. – М., 1990. – № 4.
3. Установка для получения биогаза : А.С. № 1587021 СССР : МПК⁵ С 02 F 11/04, 3/28 / Шапоров В.П., Зінченко М.Г., Ткач Г.А. – № 4310315 ; Заявл. 29.09.1987; Опубл. 23.08.1990; Бюл. № 31.
4. Зінченко М.Г., Кравченко С.А., Тинда О.А. Автономний біоенергетичний центр для вироблення електричної та теплової енергії й одержання органічних добрив з відходів сільського господарства. Структурна перебудова та екологізація економіки в контексті переходу України до збалансованого розвитку // Матеріали III Українського екологічного конгресу, 10-11 грудня 2009р. – К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2009. – 323с.
5. Ткач Г.А., Зинченко М.Г., Дрожина Д.Н. Технологический регламент на опытно-промышленную установку очистки сточных вод ПСЗ производительностью 3,0 тыс. тонн переработки свеклы в сутки. – Харьков, 1996 г.

6. Driessen W.J.B.M. Novel anaerobic and aerobic process to meet strict effluent plant design requirements. / Driessen W.J.B.M., Habets L. H.A., Vereijken T // Ferment Vol. 10, No. 4, August 1997, pp. 243 – 250.

7. Driessen W.J.B.M. Compact combined anaerobic and aerobic process for the treatment of industrial effluent. / Driessen W.J.B.M., Yspeert P., Yspeert Y., Vereijken T. // Environmental Forum. Colombia-Canada: Solutions to Environmental Problems in Latin America. May 24-26, 2000. Cartagena de Indias, Colombia.

8. Kalyuzhnyi, S. Novel dispersed plug flow model for UASB reactors focusing on sludge dynamics. / Kalyuzhnyi, S.; Fedorovich, V.; Lens, P.N.L. // 9th World Congress “Anaerobic Digestion 2001” (Antwerpen, Belgium, 2-6 September, 2001).

9. Тында О.А. Использование IC-UASB- реакторов для переработки стоков производства картона на ООО «Рубежанский картонно-тарный комбинат». / О.А. Тында, Н.В. Гордеенок, М.Г. Зинченко, В.А. Бударин // Материалы Шестой международной конференции «Энергия из биомассы» 13-14 сентября 2010 г., г. Киев, Украина. – К., НТЦ «Биомасса», 2010 г.

У статті представлено результати розробки та впровадження біологічних технологій для утилізації стічних вод агропромислових та виробничих підприємств. Показані можливості комерційного використання біогазових установок у різноманітних сільськогосподарських комплексах. Надано аналіз основних напрямків інтенсифікації процесу метанового зброджування органічних відходів. Показані шляхи подальшого вдосконалення конструктивного оформлення технології метаногенезу.

The results of the development and implementation of biologic technologies used for utilization of agro-industrial and industrial wastewaters are presented in this paper. The opportunities for the commercial usage of biogas plants in different agricultural systems are considered. The analysis of the main directions of the anaerobic organic waste treatment intensification is given. The way of the further improvement of constructive solutions for methanogenesis is shown.